

基于 CompactRIO 的 HL-2A 环向场电流控制

鲜白驹, 李华俊, 卜明南
(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 基于 LabVIEW 图形化编程语言, 以 NI 公司 PAC 产品系列中的 CompactRIO 为硬件平台, 研制出一套适用于脉冲工作模式的励磁调节器。该调节器以工业 PC 作为上位机, 由嵌入式系统构成下位机, 实时监测和控制每一次等离子体放电期间的工作状态。利用数字式增量 PID 算法对环向场电流进行反馈控制, 控制周期为 1 ms。实际运行结果表明: 研制的调节器具有控制精度高、稳定可靠等优点。

关键词: 脉冲发电机; 环向场电流; PID; CompactRIO; 励磁控制

中图分类号: TM 31 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)05-0095-05

Current Control of HL-2A Toroidal Field Based on CompactRIO

XIAN Baiju, LI HuaJun, BU Mingnan
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: An excitation regulator capable of pulsed operation mode was developed using LabVIEW graphical programming language and NI CompactRIO. The excitation regulator including industrial PC as host computer and embedded system as slave computer was able to monitor and control the system working state during discharging in real time. The digital incremental PID algorithm was used to feedback control the toroidal field current with a control period of 1 ms. Actual operation results showed that the regulator had the advantages of high control precision, stability and reliability.

Key words: impulse generator; toroidal field current; PID; CompactRIO; excitation control

0 引言

HL-2A 托卡马克装置的供电系统由 3 台独立运行的飞轮储能脉冲发电机组向各自的负载供电, 不涉及大型电力系统中并联有功和无功功率的分配、多台发电机组稳态运行等问题。其中 2 台 80 MAV 的六相发电机通过不可控整流柜为装置的环向场线圈供电, 通过励磁调节器控制发电机端电压进而控制环向场电流^[1-2]。在不同的放电参数要求下, 环向场电流要有很好的跟随性, 每次等离子体放电时间约为 5 s, 环向场电源系统时间常数大, 发电机转速下降快, 均对发电机励磁调节器提出了更高的要求。

目前, 励磁调节器采用操作繁琐、人机界面单

一的基于 DOS 操作系统的微机控制器, 不易实现小型化、低功耗以及模块化升级, 实时控制时对硬件采集卡的采样速率依赖程度较高^[3]。此外, 不利于 HL-2A 托卡马克装置整个控制系统的兼容和扩展。

NI CompactRIO 可重配嵌入式采集与控制系, 同时具有实时高性能控制器、可重配置的 FPGA 集成电路、C 系列 I/O 模块^[4]。结合 LabVIEW 软件开发平台, 可充分发挥出虚拟仪器技术开发周期短、集成度高、扩展性强等优势, 能够实时控制和监测每一次等离子体放电期间整个环向场电源系统的工作过程与状态^[5-6]。

为了满足 HL-2A 物理试验的要求, 本文设计

作者简介: 鲜白驹(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为发电机励磁控制。

李华俊(1970—), 男, 研究员级高级工程师, 研究方向为大功率脉冲供电技术。

卜明南(1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为发电机励磁控制与电力电子技术。

励磁调节器,并利用 LabVIEW 语言实现数字式增量 PID 算法编程,以达到对环向场电流的控制。

1 环向场供电系统概况

环向场线圈的作用是在 HL-2A 装置真空室内形成环向的强磁场,以约束等离子体电流。环向场线圈参数如表 1 所示。

表 1 环向场线圈参数

参数名称	参数值
最大场强/T	2.8
最大电流/kA	45
总电感/mH	230
总电阻/mΩ	60
最大平顶时间/s	5
最大电流等效时间/s	10
最大负荷重复率/h	2

HL-2A 托卡马克装置供电系统需要在中央控制系统(中控)的统一调度和管理下,与其他各个子系统协同工作以完成每一次脉冲放电试验。环向场电流由励磁调节器进行反馈控制。正常工作运行时励磁调节器与中控各子系统间的信息交互如图 1 所示。放电期间,试验管理人员根据物理试验参数要求,利用放电管理计算机制作放电设置文件(DPF 和 VEC 文件),并且在 2 次脉冲放电的间隙将放电设置文件通过工业以太网分别传送至时序系统 PLC、数据服务器和 EPICS 服务器。励磁调节器不仅要在放电间隙读取以太网中数据服务器和 EPICS 服务器的相关状态参数和数据文件,而且在放电结束后要将放电期间采集的波形数据上传至本地与中控数据服务器^[7]。在运行

期间通过检测来自时序系统 PLC 的时序控制电平信号来触发励磁器工作,以按照中控既定的要求对环向场电流进行反馈控制^[8]。

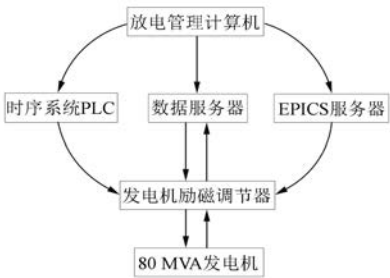


图 1 励磁调节器与中控子系统的信息交互

因此,励磁调节器在励磁电压调整快速性、脉冲工作可靠性和一致性以及人机交互界面等方面有较高的要求,并且需要满足脉冲发电机频繁地投入和退出励磁的间歇式工作模式。具体要求如下。

- (1) 结构紧凑、可扩展性强,易实现小型化和低功耗,在震动环境中使用可靠,并具有较宽的温度适用范围。
- (2) 励磁调节器具备以太网接口,可通过网络获取数据服务器和 EPICS 服务器上与放电相关的状态参数和数据文件。
- (3) 励磁调节器能满足分布式控制,控制器和上位机通过网络进行数据交互传递,任务处理时形成互补,同时监视和控制也可通过远程上位机进行操作处理。

2 励磁调节器硬件结构

励磁调节器由上位机和包含实时控制、可重配 FPGA 与 C 系列模块组成的 CompactRIO 嵌入式系统构成。详细的硬件结构如图 2 所示。

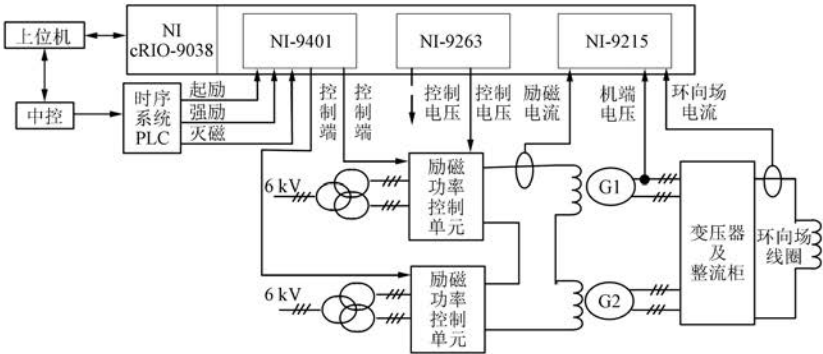


图 2 励磁反馈控制硬件结构图

上位机运行 Microsoft 的 Windows7 操作系统并安装 NI LabVIEW 软件用于图形用户界面 (GUI) 设计开发工具包。上位机主要负责与中控以及 CompactRIO 实时控制器通信和数据共享, 实现参数监测、波形显示、人机交互等非实时任务^[3-4,9]。CompactRIO 嵌入式系统由 NI cRIO-9038 实时控制器、NI-9401、NI-9263、NI-9215 模块所组成, 主要完成数据采集、监控和反馈控制等任务。位于励磁功率柜中的可控整流器的移相控制角由控制电压 U_k 和控制信号 CTRL 所决定, 其中 U_k 与控制角呈负相关, 而 CTRL=1 或 0 分别对应解封或封锁励磁功率单元。NI cRIO-9038 机箱包含 8 个 C 系列 I/O 模块插槽、1.33 GHz 双核 Intel-Atom 处理器、8 GB 非易失性存储以及 2 个千兆以太网接口, 利于控制器、上位机、中控三者之间的数据交换。NI-9401 是一款 8 通道、100 ns 的双向数字输入输出 (DIO) 模块并提供 8 个 TTL 数字输入输出通道, 输入通道检测来自时序系统 PLC 的起励、强励和灭磁信号, 输出通道作为控制信号 CTRL 的输出以控制励磁功率单元的解封或封锁。NI-9263 是一款 4 通道 100 kS/s 同步更新模拟输出 (AO) 模块, 以 1 kS/s 的更新速率输出控制电压 U_k 至励磁功率单元。NI-9215 具有 4 路同步采样模拟输入模块 (AI), 有效输入电压量程 $-10 \sim +10$ V, 适用于采样经传感器转换后的环向场电流与发电机端电压信号。

3 励磁调节器时序反馈控制

每次等离子体放电之前中控会设置波形矢量文件与控制参数, 解析得到的波形如图 3 所示。其中 ccIF 作为环向场电流参考波形, 要求励磁调节器通过控制励磁电压, 使环向场电流幅值按照 ccIF 的波形趋势变化。在环向场电流测量异常时, 励磁调节器以 ccW1 作为励磁电压的参考波形, 按照 ccW1 的波形变化趋势输出励磁电压, 以达到冗余备份的目的。

控制参数文件与电机控制相关的类中, 给出了重要的时间节点参数, 包括强励时刻 StrgEx 和反馈开始时刻 FBStart。整合控制参数文件和波形矢量文件中的重要时刻信息, 可得励磁控制过程时序, 如图 4 所示。根据 HL-2A 定时系统的运行方式将等离子体放电时刻作为零时间点, 放电

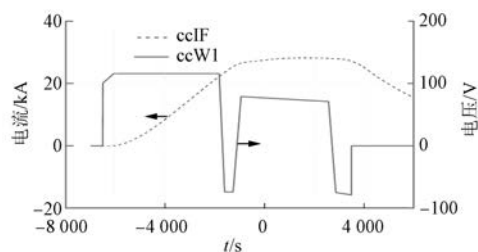


图3 中控设置的参考波形

始于 $-9\,000$ ms, 结束于 $4\,500$ ms。维持 13.5 s 的过程分为 4 个阶段: 延时阶段、通电阶段、反馈阶段、灭磁阶段。其中强励触发时刻 ($-9\,000$ ms) 和波形开始时刻 WvStart 之间为延时阶段, 此阶段用于计时但不做任何控制。波形开始时刻 WvStart 与反馈开始时刻 FBStart 之间为通电阶段, 此阶段为了使环向场电流快速达到反馈设定范围, 要求励磁功率单元按 ccW1 波形输出励磁电压。反馈开始时刻 FBStart 与波形结束时刻 WvEnd 之间称为反馈阶段, 该阶段利用基于 LabVIEW 的数字式增量 PID 算法保持环向场电流的稳定。在最后的灭磁阶段为波形结束时刻 WvEnd 至励磁调节器退出工作, 该阶段励磁调节器逐渐减小控制电压 U_k 使端电压降低。

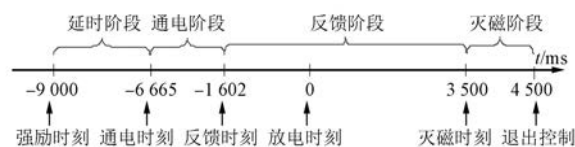


图4 反馈控制过程的时序

为了明确划分 4 个工作阶段, 通过 LabVIEW 设置了一个全局变量 t , t 的初始值通常为 $-9\,000$ ms, 励磁调节器投入运行后, 检测到时序系统 PLC 强励触发电平信号, 之后调节器以该时刻为起点, 全局变量 t 严格按照 1 ms 循环累加。选用 LabVIEW 中的“公式节点”结构, 采用类似 C 语言的 if-else 编程语言创建了一个程序段, 如图 5 所示, 强励触发时刻 StrgEx、波形开始时刻 WvStart、反馈开始时刻 FBStart、波形结束时刻 WvEnd 和全局变量 t 这 5 个 Int16 类型数据为输入端, 变量 y 是结果输出端并连接至条件选择结构, $0 \sim 3$ 对应 4 个不同的分支以实施范围阶段控制。

为了确保励磁调节器顺利进入灭磁程序, 在

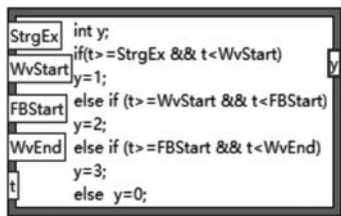


图5 工作阶段判别分类程序

考虑中控灭磁信号故障的情况下,增加延时故障即 $t>3\,500\text{ ms}$ 进行强行软件灭磁。除此之外,为了考虑环向场供电系统的安全,设置反馈是否投入选择结构,若在反馈开始时刻环向场电流处于 $0.7<(I_F/ccIF)<1.3$,即可投入PID反馈,其中 I_F 为环向场实际电流。环向场电流反馈控制的程序按照如图6所示的流程进行设计。

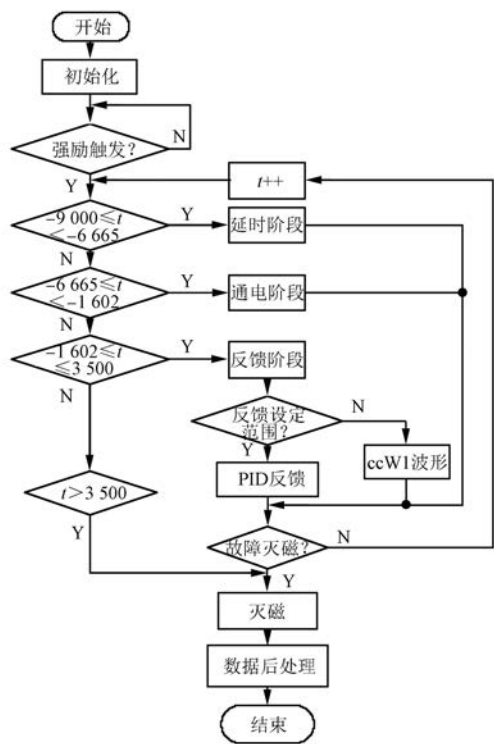


图6 环向场反馈控制程序流程图

上位机与 CompactRIO 控制器运行结构如图7所示。可以看出,实时系统包含2个循环架构,其中高优先级循环(实时循环)用于 CompactRIO 中的高实时操作,低优先级循环(非实时循环)用于上位机,两者之间通过共享变量 FIFO 进行数据传递。实时循环利用 1 ms 定时在运行期间实现 PID 反馈控制以及采样环向场

电流和发电机端电压,并输出控制电压和封锁信号到励磁功率柜。非实时循环的主要任务是:获取 EPICS 服务器中的参数,判断炮号是否刷新,解析放电参数文件并判断文件是否正确,处理放电过程中生成的数据并按指定的格式存储到文件服务器中,当然也包括转换、显示、传输和其他非实时任务。此外,还设置了一个重要的全局变量,即 Readable,使得上位机和 CompactRIO 形成互补关系,当强励触发到来之后,CompactRIO 投入控制并将 Readable 设置为零,上位机封锁读放电参数文件转为状态参数的获取和数据存储。放电结束后设置 Readable=1,上位机重新读取放电参数文件。上位机运行流程如图8所示。

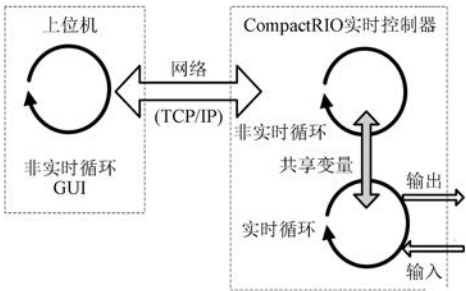


图7 上位机与 CompactRIO 的程序结构

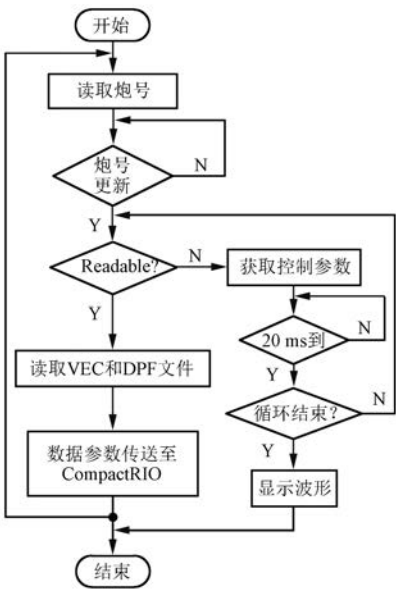


图8 上位机程序流程图

励磁调节器的控制周期 T 为 1 ms,PID 控制算法的采样周期与 T 保持一致。PID 控制算法需

按照该采样周期通过 A/D 采集被控对象的当前值 $c(k)$, 并与参考输入 $r(k)$ 作差, 得到偏差 $e(k)$, 根据初始化得到控制参数 A 、 B 、 C 和前 2 次误差 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$, 在给出了 K_p 、 T_1 、 T_D 参数以后即可计算出控制电压 U_k 增量:

$$\Delta U_k = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (1)$$

$$U_k = U_{k-1} + \Delta U_k \quad (2)$$

其中: 控制参数 A 、 B 、 C 与控制周期 T 、比例系数 K_p 、积分时间常数 T_1 、微分时间常数 T_D 有关, 且 $A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_1} + \frac{T_D}{T} \right)$; $B = K_p \left(1 + 2 \frac{T_D}{T} \right)$; $C = K_p T_D / T$ 。

通过 D/A 转换器输出用以控制被控对象, 在 LabVIEW 中借用硬件移位寄存器的概念, 类似于一个简单的先入先出结构, 是较好的 PID 控制算法。

4 试验验证

图 9 所示为环向场供电装置第 35 844 次放电波形, 其中: I_F 为环向场实际电流, U_1 为发电机端电压, 可以看出延时阶段控制器不参与工作。通电阶段发电机处于强励状态, 发电机端电压在 3 500 ms 之内迅速上升至 2 800 V, 之后的 300 ms 励磁功率柜处于逆变状态, 发电机端电压缓慢下降至 1 700 V, 出现该过程主要是由于环向场电源系统时间常数较大。从环向场电流的波形也可以看出, 环向场电流比发电机端电压明显滞后。反馈阶段投入后, 励磁调节器对环向场电流按设定电流值进行反馈控制, 以维持近 5 s 的平顶时间段。最后执行 1 000 ms 的灭磁过程, 即反馈控制结束后, 控制电压 U_k 等变化逐渐变为零, 有利于对励磁功率柜的维护。通过计算, 环向场电流所产生的磁场强度与中控要求的约束等离子体的磁场强度保持一致, 故设计达到要求。

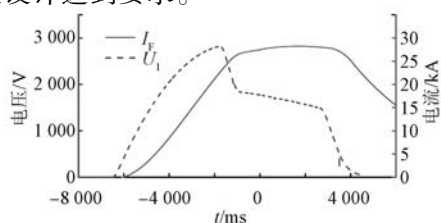


图 9 放电参数波形

5 结 语

环向场线圈作为 HL-2A 的一个重要组成部分, 环向场电流的特性直接影响着等离子体放电试验的效果与成败。通过基于 CompactRIO 硬件所构成的对环向场电流实时反馈的励磁调节器, 并利用 LabVIEW 编程语言实现控制过程, 满足了试验期间频繁投入和退出的工作模式, 并在装置上投入使用后以较高的控制精度、稳定性较好地完成了等离子体放电控制任务。

【参考文献】

- [1] 李华俊, 徐丽荣, 刘学梅, 等. HL-2A 装置环向场电源系统及其控制[J]. 兵工自动化, 2004(1): 55.
- [2] 李维斌, 卜明南, 刘学梅, 等. HL-2A 装置脉冲发电机励磁控制系统[J]. 核聚变与等离子体物理, 2014, 34(1): 40.
- [3] BILIK P, KOVAL L, HAJDUK J. CompactRIO embedded system in power quality analysis [C] // 2008 International Multiconference on Computer Science and Information Technology, 2008: 577.
- [4] YUSIVAR F, SEMBIRING R J. Implementation of space vector pulse width modulation using Compactrio [C] // 2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology, 2013.
- [5] 王丁丁, 武杰, 张杰, 等. 基于 CompactRIO 的数据采集模块设计[J]. 核技术, 2012, 35(7): 539.
- [6] MOHD S, ZULKIFLI S A, RANGKUTI R G A, et al. Electric vehicle energy management system using National Instruments' CompactRIO and LabVIEW [C] // 2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA), 2013.
- [7] 王川, 夏凡, 潘莉, 等. EPICS 在 HL-2m 控制系统 PLC 上的部署[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, 33(2): 142.
- [8] 张国辉, 夏凡, 宋显明, 等. HL-2m 装置反馈控制系统的设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011, 31(4): 332.
- [9] 王驰, 李华俊, 卜明南. 基于 CompactRIO 的脉冲发电机励磁调节器[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7): 34.

收稿日期: 2018-12-18